

## University of Groningen

### Hot recoils from cold atoms

Turkstra, Jan Willem

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2001

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Turkstra, J. W. (2001). *Hot recoils from cold atoms*. s.n.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

**Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

## 9 Nederlandse samenvatting

### 9.1 Introductie

In dit proefschrift staat zowel de interactie tussen ionen en atomen als de interactie tussen atomen en licht centraal. Ionen zijn elektrisch geladen en atomen neutraal en als een ion en een atoom elkaar "ontmoeten" dan zal het ion trachten een of meerdere elektronen van het atoom in te vangen. Echter vanwege de typisch korte duur van de ion-atoominteractie (een miljoenste van een miljardste seconde) zal de overdracht van elektronen slordig verlopen: het elektroneninvangstproces zal af en toe mislukken waardoor elektronen aangeslagen op het atoom achter kunnen blijven (excitatie). In dit werk staan elektronenoverdracht en de mislukte elektronoverdracht (excitatie) centraal. Excitatieprocessen zijn bestudeerd met een relatief traditionele methode maar de elektronenoverdracht is bestudeerd met een nieuwe experimentele methode.

De nieuwe methode is gebaseerd op het gebruik van een zogenaamde MOT (Magneto-Optical Trap), een val voor atomen. De val berust op het principe dat licht van precies de juiste frequentie (kleur) op een atoom een enorme kracht, ongeveer 100.000 maal de zwaartekracht, kan uitoefenen. Met behulp van laserbundels kunnen daardoor atomen vast gehouden worden en bovendien kan ook iedere beweging van de verzamelde atomen worden onderdrukt tot ze nagenoeg stilstaan (met minder dan 2 km per uur heen en weer bewegen). Het gevolg is dan een "wolkje" van 10 tot 100 miljoen atomen, minder dan één millimeter in diameter groot, en gekoeld tot beneden eenduizendste graad boven het absolute nulpunt.

De motivatie voor de nieuwe methode bestaat daaruit dat nu de volledige interactie van ion en atoom gemeten kan worden. Behalve de vraag "welke processen gebeuren er", kan nu ook de vraag "hoe kwamen deze processen tot stand" beantwoord worden. De vragen worden beantwoord door de volledige impuls (snelheid) te meten van de deeltjes die ten gevolge van elektroninvangstprocessen uit de MOT gestoten worden door projektielionen. Theoretische modellen moeten nu beide vragen bevredigend beantwoorden en worden daardoor fundamenteel dieper getest op hun fysische inhoud.

Deze Nederlandse samenvatting bestaat uit een sectie die het nut van ion-atoomonderzoek toelicht (*Botsingen van atomen en ionen*), een sectie die de experimentel resultaten samenvat (*in dit werk...*), een sectie die het principe van laserkoeling uitlegt (*Laserkoeling*) en een korte conclusie (*Conclusie*).

## 9.2 Botsingen van atomen en ionen

In de inleiding is al aangegeven wat er gebeurt als ionen en atomen botsen. De positief geladen ionen zullen proberen een of meerdere elektronen van een atoom in te vangen om weer neutraal te worden. De ingevangen elektronen zullen zich vaak in aangeslagen toestanden bevinden en deze toestanden zullen in één of meerdere stappen naar de grondtoestand vervallen. De daarbij vrijkomende energie wordt uitgezonden in de vorm van licht (fotonen) of andere elektronen (twee aangeslagen elektronen (A en B) kunnen een deal maken: A gaat naar de grondtoestand en B verlaat met behulp van de energie van A het ion). Echter ook als het elektroneninvangst proces mislukt kunnen de achtergebleven aangeslagen toestanden vervallen waardoor fotonen en elektronen uitgezonden (i.e. ionisatie) kunnen worden.

De licht- en elektronenspectra die op deze manier ontstaan zijn specifiek voor elk ion en atoom. De spectra verraden welke atomen en ionen met elkaar botsten en zelfs bij welke temperatuur (snelheid) de botsingen plaatsvonden. En dat leidt tot de voornaamste motivatie voor ion-atoombotsingenonderzoek: de diagnostiek van plasma's. Een plasma is (algemeen gesproken) een gas dat zo heet is dat de atomen elektronen verliezen (en dus ion worden) in de botsingen met andere elektronen, atomen en ionen. Een plasma bestaat dus uit een mix van atomen, ionen en vrije elektronen die constant met elkaar botsen en dus licht uitzenden (de uitgezonden elektronen komen vaak niet ver). Aan de hand van het lichtspectrum kan men veel belangrijke eigenschappen van het plasma (temperatuur, samenstelling) te weten komen.

Er zijn in wezen twee soorten plasma's: "man made" plasma's (gemaakt in laboratoria) en natuurlijke plasma's bijvoorbeeld in de interstellaire ruimte of sterren. Een gedeelte van dit werk was ook van directe relevantie voor een bijzonder type "man made" plasma: de thermo-nucleaire (fusie) plasma's waarin geprobeerd wordt de zon na te bootsen. Deze plasmas bestaan voornamelijk uit waterstof

(beter gezegd: deuterium en tritium) en zijn zo heet dat kernfusie optreed. Om zo'n plasma beter te kunnen begrijpen wordt er een bundel neutrale lithiatomen in het plasma geschoten. De lithiatomen botsen met de ionen van het plasma en licht wordt uitgezonden. Met dit licht kan, mede dankzij de gedetailleerde kennis van lithium-ioninteracties opgedaan in dit werk, het plasma geanalyseerd en gemodelleerd worden.

Een klassiek voorbeeld van licht veroorzaakt door natuurlijke ion-atoom botsingen is het Aurora Borealis fenomeen, oftewel noorderlicht (zie ook de omslag van dit boek). Noorderlicht wordt veroorzaakt door botsingen van ionen uit de zonnewind (bestaande voornamelijk uit protonen maar ook uit relatief snelle hooggeladen ionen) met de atomen in de bovenste aardatmosfeer waarbij licht vrijkomt. Andere voorbeelden van natuurlijke plasma's zijn de zon, sterren en vaak ook interstellair gasnevels. In de licht spectra van al deze fenomenen zit een grote hoeveelheid informatie betreffende samenstelling en temperatuur opgesloten. Deze informatie kan echter alleen ontcijferd worden met een zeer gedegen begrip van ion-atoom botsingen.

### 9.3 In dit werk...

In dit werk is de interactie tussen ionen en atomen bestudeerd met twee experimentele methoden en vergeleken met drie theoretische modellen. Met een bewezen experimentele techniek (fotonenemissiespectroscopie) is atomaire fluorescentie door aanslag met ionen (zeer) precies gemeten en vergeleken met een van de meest verfijnde theoretische model (de kwantummechanische Atomic Orbital Close Coupling (AO-CC) beschrijving). Met een nieuw ontwikkelde techniek (recoil momentum spectroscopie met behulp van laser gekoelde atomen) is ladingsoverdracht van natrium naar hooggeladen ionen ( $O^{6+}$ ) gemeten en vergeleken met het "over-the-barrier" (OtB) model en het meer verfijnde "Classical Trajectory Monte Carlo" (CTMC) (beide echter niet kwantummechanisch).

Met behulp van fotonenemissiespectroscopie hebben we de excitatie (beter gezegd: de de-excitatie) van lithium na interactie met protonen en alfadeeltjes ( $He^{2+}$ ) bestudeerd. Dit onderzoek is niet alleen van algemeen fysisch belang (het beter begrijpen en modeleren van ion-atoombotsingen) maar ook belangrijk voor de diagnostiek van fusieplasmas. Excitatieprocessen zijn echter moeilijk theoretisch te modeleren. Elektronoverdracht lukt volgens eenvoudige modellen namelijk altijd (mits ion en atoom dicht genoeg bij elkaar komen) en alleen de meest verfijnde modellen kunnen het "mislukken" van elektron overdracht voorspellen. De goede overeenkomsten tussen de gemeten en berekende lithiumentexcitatie processen geven echter aan dat voor eenvoudige botsings processen (protonen,  $He^{2+}$  en lithium behoren tot de minst gecompliceerde ionen en atomen die er zijn) een theoretisch model als AO-CC tot in ongekend veel detail de ion-lithium interacties

kan berekenen.

Helaas vallen veel ion-atoombotsingen niet in de categorie "eenvoudig" en dan is de AO-CC methode niet te gebruiken. Zodra er meer dan één elektron actief is in een botsing ("meervoudige elektroneninvangst") of de lading van het ion hoog is (meer dan zesvoudig geladen) is een kwantummechanische modellering van de botsing niet meer mogelijk ("de matrices worden te groot"). Daarom is het noodzakelijk om theoretische methodes (verder) te ontwikkelen die wel met meervoudige elektroneninvangst en hooggeladen ionen kunnen omgaan.

Voor de verdere ontwikkeling van deze theoretische methodes is het wenselijk om als uitgangspunt een experimentele methode te hebben die op meer dan het "black box principe" berust. Met het "black box principe" bedoelen we dat er aan de ene kant ionen (en atomen) het experiment ingaan en er aan de andere kant licht uit komt. Men weet dan wel precies hoeveel licht en van welke kleur gemaakt wordt in de ion-atoombotsingen maar niet hoe dit precies tot stand is gekomen. Het zou bijvoorbeeld interessant zijn te weten hoe dicht ion en atoom bij elkaar zijn geweest (de botsingsparameter) om een bepaald proces te laten gebeuren. Op deze manier zijn theorie en experiment op een meer fundamentele manier met elkaar te vergelijken.

Een experimentele methode die dit voor ons kan doen is Recoil Ion Momentum Spectroscopy oftewel: spectroscopie gebaseerd op de impuls van het teruggestoten deeltje. Het idee berust hierop dat een atoom van impuls (snelheid) verandert door zijn interactie met een ion. Na de botsing zal het teruggestoten deeltje snelheidscomponenten hebben in de twee richtingen, gedefinieerd ten opzichte van richting van de projectielen: naar voren/achteren, de zogenaamde longitudinale richting, en naar links/rechts, de transversale richting. De impuls van het teruggestoten deeltje in transversale richting komt direkt overeen met de verstrooiing van het ion en atoom en deze is weer direkt gecorreleerd aan de afstand van dichtste benadering in de botsing. De impuls in de voor of achterwaardse richting geeft direkt aan of er energie verloren of gewonnen is in de ion-atoominteractie: als er energie verloren is zal het teruggestoten deeltje naar voren bewegen en bij energie winst zal een teruggestoten deeltje naar achteren bewegen. De energiewinst of verlies wordt echter geheel veroorzaakt door elektronen die van toestand zijn veranderd door de botsing en de longitudinale impuls komt dus direkt overeen met de toestand van de elektronen na de botsing. Samengevat: de longitudinale impuls van het teruggestoten deeltje verteld ons wat er is gebeurd tijdens de botsing, kortom welke elektronische transitie er plaatsvonden, en de transversale impuls vertelt ons bij welke impact parameter dit is gebeurd.

De gemeten longitudinale en transversale impulsen van  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Na}^{2+}$ , ..  $\text{Na}^{4+}$  teruggestoten deeltjes (recoils) gemaakt in botsingen met  $\text{O}^{6+}$  zijn vergeleken met het eenvoudige Over-the-Barrier (OtB) en meer het verfijnde CTMC model. De uitkomsten zijn verrassend te noemen. Het eenvoudige OtB model kon de lon-

gitudinale impuls spectra voor  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Na}^{2+}$ ,...  $\text{Na}^{4+}$  recoils goed voorspellen daar waar CTMC (vooral bij de  $\text{Na}^{3+}$  en  $\text{Na}^{4+}$ ) behoorlijk afweek van het experiment. De transversale spectra van het CTMC model kwamen daarentegen behoorlijk goed overeen met het experiment, met uitzondering misschien van de  $\text{Na}^{3+}$ . Het OtB model is wat minder geschikt voor het voorspellen van transversale impulsen maar sloot toch altijd goed aan met het CTMC model en kon de  $\text{Na}^{3+}$  transversale impulsen dus ook niet bevredigend voorspellen.

De hoofdoorzaak in de verschillen tussen de theorie voor meervoudige elektroneninvangst en experiment moet waarschijnlijk gezocht worden in de correcte modelering van het grote aantal elektronen dat actief lijkt te zijn in deze botsing. Zo geeft het experiment bijvoorbeeld aan dat in de productie van  $\text{Na}^{3+}$  recoils door  $\text{O}^{6+}$  ionen tenminste vijf elektronen beschouwd moeten worden, waarvan dan slechts drie elektronen dus daadwerkelijk het natrium zullen verlaten. Van het OtB model is echter bekend dat het de "mislukte elektroneninvangst" min of meer intuïtief beschrijft en van CTMC is bekend dat het moeilijk vele (diep gebonden) elektronen juist kan modeleren. Dit werk lijkt dat nogmaals te hebben aangetoond.

We zijn tot nu toe voorbij gegaan aan het feit dat vooral de impulsen van  $\text{Na}^+$  erg moeilijk te meten zijn. De impulsen van het natrium na de botsing zijn namelijk te verwaarlozen in vergelijking met de typische snelheden van atomen bij kamertemperatuur. Bovendien is het ook essentieel dat het volume waarin de interactie van de projectielionen met het natrium plaatsvindt zeer klein is, omdat we de positie van het natrium voor de botsing heel exakt moeten weten. De atomen moeten dus in de gas fase gekoeld worden tot vrijwel het absolute nulpunt en bovendien ook nog beperkt worden tot minder dan een kubieke millimeter. Een typische klus voor laserkoeling dus...

## 9.4 Laserkoeling

Koelen met lasers lijkt een tegenspraak in termen maar dat is het niet. Het zal duidelijk zijn dat laserlicht in dit werk fundamenteel anders gebruikt wordt dan waar lasers door staalplaten snijden. Licht bestaat uit heel veel energie en een klein beetje impuls wat zich ergens laat vergelijken met een handgranaat die langzaam over de vloer rolt. Voor het verhitten van materiaal wordt de energie van de granaat gebruikt en voor het koelen van atomen wordt alleen de rollende beweging van de granaat gebruikt. Laserbundels (met precies de juiste eigenschappen) kunnen atomen stilzetten door enkel en alleen impuls overdracht (de terugstoot) van de lichtdeeltjes fotonen te gebruiken.

natriumatomen absorberen alleen geel licht (bekent van straatlantaarnen) als het exact de juiste frekwentie heeft. Als de frekwentie iets te laag is maar het atoom beweegt echter tegen de richting van de licht in, dan kan het atoom het licht toch nog als van de juiste kleur zijnde ervaren en het absorberen (het beroemde

Doppler effect: de geluiden van een aankomende trein of auto klinken hoger dan ze eigenlijk zijn). Door nu de atomen van uit alle richtingen met laserlicht van iets te lage frekwentie te beschijnen zullen alleen de atomen die tegen een laser bundel in bewegen het licht absorberen. De atomen zullen vrijwel onmiddellijk na de absorbtie het licht wel weer (in alle richtingen) uitzenden, maar de impuls vermindering tegen hun bewegingsrichting in zullen ze gemiddeld behouden. Op deze manier wordt elke beweging van de atomen onderdrukt door de laserbundels totdat de atomen nog met minder dan 0.5 m/s ( $\sim$ milli Kelvin) bewegen.

## 9.5 Conclusie

We hebben in dit werk gezien hoe met een nieuwe experimentele methode, gebaseerd op koelen van atomen met laserlicht, interacties van ionen met atomen op een completere wijze met theorie vergeleken kunnen worden dan met conventionele methoden mogelijk was. We stelden vast dat het moeilijk is voor theoretische modellen ( "OtB en CTMC ") om zowel de ion-atoomverstrooiing (equivalent met "hoe kwamen deze processen tot stand") als de toestand van elektronen na een botsing ("welke processen gebeuren er") juist te voorspellen. In de nabije toekomst mag men een verbetering in de theoretische modellen verwachten, maar mede te verwachten is ook een grote toename in de experimentele resolutie...